

в работе результаты отвечают высоким требованиям, предъявляемым к качеству, ресурсу и надежности защитных ионно-плазменных покрытий для лопаток авиационных ГТД, и обеспечивают их конкурентоспособность и рентабельность, что подтверждено в условиях промышленного серийного производства (ФГУП ММП «Салют» и др.).

ЛИТЕРАТУРА

1. Полетика И.М., Борисов М.Д., Краев Г.В., Вайсман А.Ф., Голковский М.Г. Особенности формирования структуры и свойства поверхностного слоя стали при облучении пучком релятивистских электронов //МиТОМ, 1997, №4, с. 13–16.
2. Клименов В.А., Иванов Ю.Ф., Первалова О.Б., Проскуровский Д.И. и др. Формирование структуры и механизмы упрочнения поверхностных слоев нержавеющей стали, обработанных низкоэнергетическим сильноточным электронным пучком //ФХОМ, 2001, №2, с. 41–47.
3. Мубояджян С.А., Будиновский С.А. Промышленная установка МАП-1 для нанесения защитных покрытий различного назначения //Авиационная промышленность, 1995, №7–8, с. 44–48.
4. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А., Будиновский С.А., Помелов Я.А. Ионно-плазменные защитные покрытия для лопаток газотурбинных двигателей //Конверсия в машиностроении, 1999, №2, с. 42–47.
5. Мубояджян С.А., Будиновский С.А., Помелов Я.А. Современные процессы ионной обработки поверхности в плазме вакуумного дугового разряда //В сб.: Авиационные материалы и технологии. Вып. Высокожаропрочные материалы для современных и перспективных ГТД и прогрессивные технологии их производства.– М.: ВИАМ, 2003, с. 132 –142.

УДК 620.197

С.А. Будиновский, С.А. Мубояджян

РАЗРАБОТКА НОВЫХ ПРОЦЕССОВ УДАЛЕНИЯ ОТРАБОТАННЫХ
ЖАРОСТОЙКИХ АЛЮМИНИДНЫХ ПОКРЫТИЙ С ПОВЕРХНОСТИ
ПЕРА РАБОЧИХ ЛОПАТОК ТУРБИН

Высокая стоимость современных жаропрочных литейных никелевых сплавов и сложность технологических процессов изготовления охлаждаемых рабочих лопаток турбин с направленной или монокристаллической структурой делают все более актуальным вопрос продления срока их службы с помощью ремонта. Для проведения ремонта лопатки, необходимо удалить с ее поверхности остатки жаростойкого алюминидного покрытия, которое в процессе эксплуатации утрачивает свои защитные свойства из-за обеднения слоя покрытия алюминием или появления трещин. Изменения состава покрытия или его повреждения, как правило, неравномерны по высоте и контуру профильной части лопатки из-за неоднородности температур и напряжений, воздействующих на поверхность пера в процессе эксплуатации. Покрытие необходимо удалить, так как для восстановления оптимальной (гарантирующей необходимую прочность) структуры жаропрочного сплава (ЖС) лопатки при ремонте целесообразно проводить

высокотемпературную термообработку в вакууме. Присутствие в этом случае на поверхности пера покрытия, состав которого существенно отличается от состава защищаемого сплава, может привести к заметным изменениям элементного и фазового состава материала лопатки и потере им прочностных свойств.

В настоящее время для удаления остатков покрытия с поверхности рабочих лопаток турбин используют в основном химико-механические методы обработки поверхности, предусматривающие химическое травление или разрыхление слоя покрытия и последующую гидроабразивную, пескоструйную или механическую зачистку поверхности пера. В табл. 1 представлены составы некоторых растворов, применяющихся для удаления жаростойких покрытий у нас и за рубежом. Видно, что для химического удаления покрытий в основном используются концентрированные водные растворы кислот. Все представленные растворы предназначены для удаления покрытий определенного типа. В зависимости от состава покрытия процесс его рыхления или удаления может занимать от нескольких десятков минут до нескольких часов. Наиболее заметное влияние на результат травления оказывает содержание в удаляемом слое алюминия и хрома [1].

Таблица 1

Состав растворов для удаления жаростойких покрытий

Состав водного раствора	Дополнительные сведения	Источник
HNO_3 (13–15% объемн.; 1,4 г/см ³)+ HCl (19–21% объемн.; 1,19 г/см ³) + Fe_2SO_4 (1–3% объемн.)	–	[1]
HNO_3 (43–45% объемн.)+ HCl (7–12% объемн.) + H_2SO_4 (0,1–1,5% объемн.)	–	Пат.4425185 (США)
HNO_3 (8% по массе)+ HF (2% по массе)+ Fe (порошок; 2–4 г/л)	Выдержка при 10–40°C, 40–90 мин	Пат.3622391 (США)
HNO_3 (25–75% объемн.)+ H_3PO_4 (75–25% объемн.)	Выдержка при 63–80°C, 30–120 мин; обдувка песком (размер частиц 25–60 мкм)	Пат.1407106 (США)
HNO_3 (280–330 г/л)+ HCl (40–60 г/л)+ FeCl_3 (70–100 г/л) + этилендиаминовая кислота (1–3 г/л)	Удаление покрытия СДП-2: температура комнатная, 50–70 мин	А.с.1324344 (СССР)
NaOH (460–650 г/л)+ NaNO_3 (170–250 г/л)	Удаление виброшлифовкой в контейнере с гранулами	Пат.2094200 (РФ)
Для удаления покрытий предлагается использовать струю жидкости высокого давления	Давление от 1406 до 4219 ат (140,6–421,9 МПа)	Пат.2071507 (РФ)

Добиться полного травливания отработанного покрытия с поверхности пера лопатки, как правило, не удается, так как оно имеет различный состав и толщину по высоте и контуру пера. Поэтому участки пера лопаток с более толстым или плохо травливаемым слоем покрытия дополнительно обрабатывают другими способами (гидроабразивная или пескоструйная обработка поверхности, ручная полировка). Кроме того, при травлении неизбежно взаимодействие агрессивного раствора с материалом замковой части лопатки и внутренней полости пера, что требует предварительной защиты этих частей лопатки с помощью специальных лаков и значительно усложняет технологический процесс удаления покрытия в целом. Для примера можно привести технологию удаления покрытий при ремонте лопаток ТВД двигателей РД-33, которая включает в себя: удаление оксидов и нагара с поверхности пера; нанесение лака на замок, внутреннюю полость, перо; удаление лака с мест, подлежащих химическому травлению; химическое обезжиривание в водном растворе ряда солей, рыхление покрытия в концентрированном растворе азотной кислоты при повышенной температуре, нейтра-

лизацию в растворе соды, длительную промывку горячей водой, сушку, выжигание лака, удаление разрыхленного слоя пескоструйной обработкой корундом.

Методы удаления покрытий, связанные с механическим воздействием керамических гранул или жидкости при высоком давлении на обрабатываемую поверхность, более экологичны, но могут приводить к деформации и повреждению кромок пера рабочих лопаток турбин.

Таким образом, представляется целесообразным поиск нового способа удаления отработанных жаростойких алюминидных покрытий, который отвечал бы следующим требованиям:

- независимость процесса травления от состава удаляемого слоя;
- высокая скорость травления покрытий (не менее 1 мкм/мин);
- снижение трудоемкости процесса;
- снижение токсичности используемых для травления растворов.

По результатам анализа открытой патентной и научно-технической литературы, для проведения работ были выбраны два направления исследований: травление поверхности жаропрочных сплавов (ЖС) в плазме вакуумного дугового разряда и обработка электрическим разрядом в среде водного электролита.

Первое направление рассматривает возможность удаления покрытий ионным травлением (ИТ) в сильно ионизированной металлической плазме вакуумного дугового разряда и представляет собой разновидность ионно-плазменного процесса, который достаточно широко используется в отрасли для нанесения покрытий и обработки поверхности деталей ГТД [2].

Второе направление работы относится к электрохимическим методам обработки поверхности металлов и сплавов [3]. Обычная электрохимическая размерная обработка производится при малых расстояниях между электродами (0,2–0,8 мм), больших плотностях тока (10–100 А/см²), с прокачкой электролита в межэлектродном зазоре (со скоростью 5–40 м/с) для удаления продуктов растворения и стабилизации электродных процессов [4]. Точность обработки достигает 150–200 мкм. Поэтому для удаления жаростойких покрытий, толщина которых не превышает 100 мкм, электрохимическое растворение (ЭХР) поверхности до последнего времени в ремонте серийных ГТД не использовалось. В то же время попытки создать такой процесс предпринимались [5, 6]. Предварительные эксперименты по удалению серийных покрытий СДП-2 (Ni–Cr–Al–Y) и ВСДП-11 (Ni–Al–Si–Y) с использованием малоцентрированных (до 10 г/дм³) электролитов из водных растворов ряда кислот и солей показали, что удаление покрытий можно производить при двух режимах электрохимической обработки поверхности: ЭХР и микродуговое оксидирование (МДО) поверхности [7]. Реализовать режим МДО можно при обработке металлов, оксиды которых обладают полупроводниковыми свойствами. К ним, в том числе, относятся и основные легирующие элементы жаростойких алюминидных покрытий и ЖС: Ni, Al, Co, W, Mo, Nb, Ti, Ta и т. д. Характерным свойством МДО является возможность равномерного оксидирования поверхностей детали сложной формы, имеющей достаточно острые кромки, аналогичные кромкам пера лопаток турбин. С увеличением плотности тока на поверхности детали до 50–100 А/дм² наблюдается переход процесса из режима ЭХР в режим МДО, сопровождающийся образованием на поверхности оксидных пленок из материала подложки, которые могут быть затем удалены пескоструйной обработкой. Толщина оксидированного слоя определяется продолжительностью обработки и электрическими параметрами процесса. Проведенные исследования показали, что скорость удаления покрытий в обоих случаях

велика и составляет более 1 мкм/мин. Режим МДО превосходит режим ЭХР по производительности в 1,5–2 раза, но значительно более энергоемок и приводит к повышению шероховатости поверхности после воздействия микродуговых и дуговых разрядов. В связи с этим дальнейшие исследования проводились с использованием комбинированных режимов обработки поверхности, когда в зависимости от плотности переменного тока в одном процессе совмещено ЭХР и МДО. Реализовать такие процессы можно при электроимпульсном травлении (ЭИТ) поверхности ЖС.

Оборудование и методика проведения экспериментов

Исследования ИТ покрытий выполнялись на установке МАП-1М [8] при токах дуги 700 ± 50 А. Ионно-плазменная обработка поверхности ЖС и покрытий проводилась ионами металлов, извлекаемых из плазмы вакуумного дугового разряда при электрических потенциалах подложки 300–900 В и плотности тока около 100 А/м^2 [9].

Процессы ЭИТ алюминидных покрытий проводились на лабораторной установке, состоящей из цилиндрической охлаждаемой ванны объемом $0,050 \text{ м}^3$, реактивного делителя напряжений, системы регистрации рабочего тока и напряжения на обрабатываемых деталях. Питание ванны осуществлялось от промышленной сети переменного тока напряжением 380 В. Параметры процесса изменялись с помощью емкостного реактивного делителя напряжения. Для приготовления электролитов использовались дистиллированная вода и кислоты: азотная (ГОСТ4461–77), серная (ГОСТ 14262–78), соляная (ГОСТ 3118–77).

Процессы удаления алюминидных покрытий различных типов исследовались на плоских образцах из сплава ЖС6У размером $70 \times 30 \times 4$ мм, цилиндрических образцах размером $\varnothing 10 \times 25$ мм и рабочих лопатках ТВД двигателя РД-33. В качестве основной характеристики процессов рассматривалась скорость травления поверхности, рассчитанная по изменению массы образцов до и после обработки, площади поверхности, продолжительности обработки и табличным значениям плотности обрабатываемых материалов. Металлографическими и микрорентгеноспектральными исследованиями определялись полнота удаления покрытий и состав поверхности ЖС после обработок (исследования проводились на микроскопе Versamet-2 и приборе JCSM-733). В исследованиях использовались покрытия из серийных сплавов СДП-2, ВСДП-9, ВСДП-11, ВСДП-16, ВСДП-18, состав которых представлен в табл. 2.

Таблица 2

Составы сплавов для жаростойких покрытий

Сплав для покрытия	Содержание легирующего элемента, % (по массе)					
	Ni	Cr	Al	Y	Ta	Si
СДП-2	Основа	18–22	11–13,5	0,3–0,6	–	–
ВСДП-9	–«–	6–12	12–13,5	0,4–0,8	1,5–2,5	–
ВСДП-11	–	–	Основа	1,1–1,8	–	4,6–5,5
ВСДП-16	2,5–5	–	–«–	1–1,5	–	–
ВСДП-18	4–6	4–6	–«–	3–5	–	–

Результаты экспериментов

Ионное травление жаростойких покрытий и ЖС в плазме вакуумной дуги.

На рис. 1 представлены зависимости скорости ИТ конденсированного покрытия СДП-2, конденсационно-диффузионного покрытия СДП-2+ВСДП-16 и диффузионного покрытия ВСДП-11 на цилиндрических образцах из сплава ЖС6У в плазме вакуумной дуги катода из сплава СДП-2. Для сравнения там же представлена кривая скорости травления сплава ЖС6У. Видно, что в условиях эксперимента скорость травления поверхности монотонно возрастает с ростом потенциала подложки для ЖС6У и покрытий. Более существенный рост скорости травления сплава ЖС6У и покрытия СДП-2 при потенциалах более 800 В, возможно, связан с особенностями их структуры. В отличие от покрытий ВСДП-11 и СДП-2+ВСДП-16 они имеют более мелкодисперсное строение. С ростом потенциала подложки скорость травления по границам зерен возрастает быстрее, чем скорость травления материала зерна, что в целом приводит к более заметному

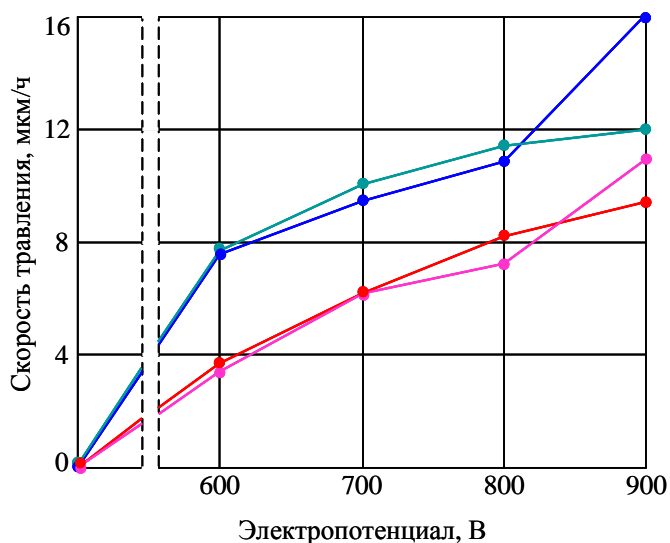


Рис. 1. Зависимость скорости ИТ различных алюминидных покрытий на образцах из сплава ЖС6У от электрического потенциала подложки:

●, ●, ● – покрытия СДП-2, СДП-2+ВСДП-16 и ВСДП-11 соответственно; ● – материал основы (сплав ЖС6У)

росту скорости ИТ образцов из материалов с мелкодисперсной структурой.

Аналогичные эксперименты были проведены на плоских образцах из сплава ЖС6У, имитирующих перо лопатки турбины с покрытиями различных типов. При травлении в плазме катодов СДП-2 и нихрома при потенциале подложки 900 В и токе разряда 700 А были получены следующие значения скоростей травления (табл. 3).

Таблица 3

Скорость травления жаростойких покрытий на сплаве ЖС6У

Тип покрытия	Скорость травления, мкм/ч, при типе катода вакуумного дугового разряда	
	Ni-10Cr	СДП-2
ЖС6У без покрытия	10,5	9,3
СДП-2	12,1	10,9
ВСДП-11	9,1	8,2
СДП-2 + ВСДП-11	11,7	9,8

Видно, что использование для процессов травления металлической плазмы более простого по составу, чем сплав СДП-2, нихромового катода, также обеспечивает достаточно высокие скорости травления алюминидных покрытий. В то же время величина скорости ИТ покрытий на плоских образцах ниже, чем на цилиндрических. Мож-

но предположить, что на скорость ИТ заметное влияние должна оказывать и температура подложки. Так как плоские образцы по массе и геометрии поверхности существенно отличаются от рассмотренных в первом эксперименте цилиндрических образцов, температура их поверхности при ИТ значительно ниже, что, по-видимому, снижает скорость ИТ поверхности.

Удаление жаростойких покрытий с поверхности ЖС в среде водного электролита. В работе использовались водные растворы неорганических кислот концентрацией 1–10 г/дм³. Выбранный диапазон концентраций кислотных электролитов в 10–30 раз ниже, чем концентрация растворов, используемых для химического удаления покрытий (см. табл. 1). Было изучено влияние состава и концентрации электролита, а также величины рабочего тока на скорость удаления покрытий СДП-2 и ВСДП-11 с образцов из сплава ЖС6У в растворах серной и азотной кислот. Полученные результаты представлены в табл. 4.

Таблица 4

Влияние концентрации электролита на основе серной кислоты и рабочего тока на скорость удаления покрытий на сплаве ЖС6У

Концентрация электролита, % (по массе)	Ток на образце, А	Напряжение на образце, В	Скорость удаления, мкм/мин, покрытий	
			ВСДП-11	СДП-2
0,25	8	20	0,69	0,8
	12	45	1,49	1,29
	20	75	9,1	7,5
0,5	8	15	1,04	1,11
1	8	11	1,17	1,25
2	8	5	1,62	1,53
4	8	4	1,71	1,61
6	8	3	1,82	1,78
8	8	2	2,09	1,85

При неизменных электрических параметрах процесса с изменением концентрации серной кислоты в электролите от 0,25 до 8% (по массе) скорость травления возрастает приблизительно в 2–3 раза для покрытий СДП-2 и ВСДП-11. Значения скорости травления покрытий близки несмотря на различия их элементного состава. Следует отметить также, что увеличение концентрации электролита приводит к снижению энергоёмкости процесса – рабочее напряжение на ванне снижается с 20 до 2 В при неизменном значении тока.

Визуальная оценка состояния поверхности образцов после ЭИТ показала, что вне зависимости от состава покрытия в первую очередь происходит его стравливание на острых кромках и примыкающих к ним плоскостях, что связано, по-видимому, с локальным повышением плотности тока в этих зонах. При полном удалении покрытия на поверхности видна макроструктура основного сплава.

С помощью универсального запоминающего осциллографа типа С8-13 были получены осциллограммы изменения величины переменного тока и напряжения на обрабатываемой детали. Характер изменения электрических параметров во времени показывает, что в процессе ЭИТ на поверхности обрабатываемых деталей имеют место микро-разряды с частотой, значительно превосходящей частоту питающего напряжения (50 Гц). Из этих результатов следует, что процесс ЭИТ покрытий может быть отнесен к электролитно-плазменным процессам.

Таким образом, проведенные исследования показали возможность создания на основе ЭИТ процесса удаления алюминидных покрытий, имеющего высокую скорость травления независимо от состава удаляемого слоя [10].

Удаление покрытий на рабочих лопатках ГТД методами ИТ и ЭИТ. Отработка технологических режимов удаления алюминидных покрытий с поверхности пера лопаток ГТД проводилась на рабочих лопатках ТВД двигателя РД-33 третьей серии из сплава ЖС32. Лопатки имели конденсационно-диффузионное покрытие типа СДП-2+ВСДП-16 на входной кромке пера и покрытие СДП-2 по остальному контуру или покрытие ВСДП-9+ВСДП-18 по всему контуру пера.

Первые процессы ИТ покрытий показали, что при расположении лопаток в технологической оснастке, используемой для напыления покрытий на установке МАП-1, скорость травления поверхности заметно ниже значений, полученных при травлении поверхности образцов. Снижение скорости травления связано, в первую очередь, с процессом взаимного осаждения распыленных атомов материала покрытия на поверхности соседних лопаток. На скорость травления влияет геометрия обрабатываемой поверхности. Скорость травления покрытия на «корыте» пера ниже на 50–60%, чем на «спинке», также из-за эффекта «перепыления» с одной кромки пера на другую. Для изучения возможности устранения этих эффектов были проведены эксперименты по травлению лопаток с использованием технологических экранов, предотвращающих осаждение распыленного материала покрытий на соседние лопатки.

На основании полученных результатов для удаления покрытия СДП-2+ВСДП-16 на рабочих лопатках турбины двигателя РД-33 был выбран процесс ИТ с разделительными экранами в плазме катода из нихрома при токе вакуумной дуги 700 А и потенциале на лопатках 800 В. Схема процесса, позволяющая проводить одновременно ИТ 24 лопаток, показана на рис. 2. ИТ проводилось на неподвижных лопатках с осмотром состояния поверхности пера через каждые два часа обработки. При указанных параметрах процесса, покрытие толщиной 80 мкм удалено со спинки за 5–6 ч обработки, а с поверхности корыта за 10–12 ч. Внешний вид лопаток после удаления покрытия представлен на рис. 3. Видна макроструктура основного материала лопаток на поверхности пера, что говорит о полном удалении покрытия. В то же время покрытие на полке пера не удалено полностью. Удаление покрытия с полки пера требует дополнительной обработки.

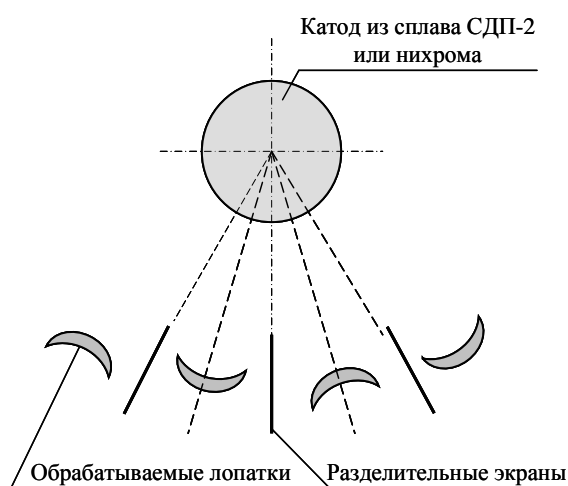


Рис. 2. Схема расположения рабочих лопаток турбин и разделительных экранов для проведения ИТ покрытий на установке МАП-1(М)

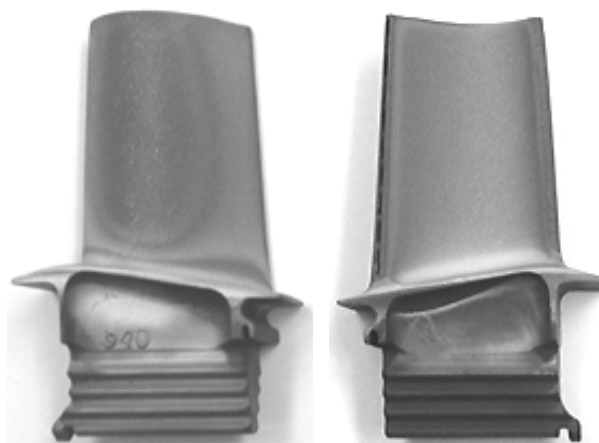


Рис. 3. Внешний вид рабочей лопатки ТВД двигателя РД-33 после удаления ионным травлением покрытия СДП-2+ВСДП-16

Удаление покрытий методом ЭИТ проводилось при одновременной обработке в ванне трех групп лопаток с трехфазным питанием процесса от промышленной сети [11]. Величина переменного электрического тока составляла в различных процессах от 4 до 24 А на лопатку. Обработка проводилась в 2%-ном растворе серной кислоты. Удаление покрытия с лопаток контролировалось по появлению на их поверхности макроструктуры основного материала. Для этого через 15 мин обработки процесс прерывался, лопатки вынимались из электролита и проводился визуальный контроль состояния поверхности. При необходимости процесс повторялся. По окончании обработки также визуально контролировалось состояние входной и выходной кромок пера лопаток для предотвращения растрыва и изменения геометрии указанных участков поверхности.

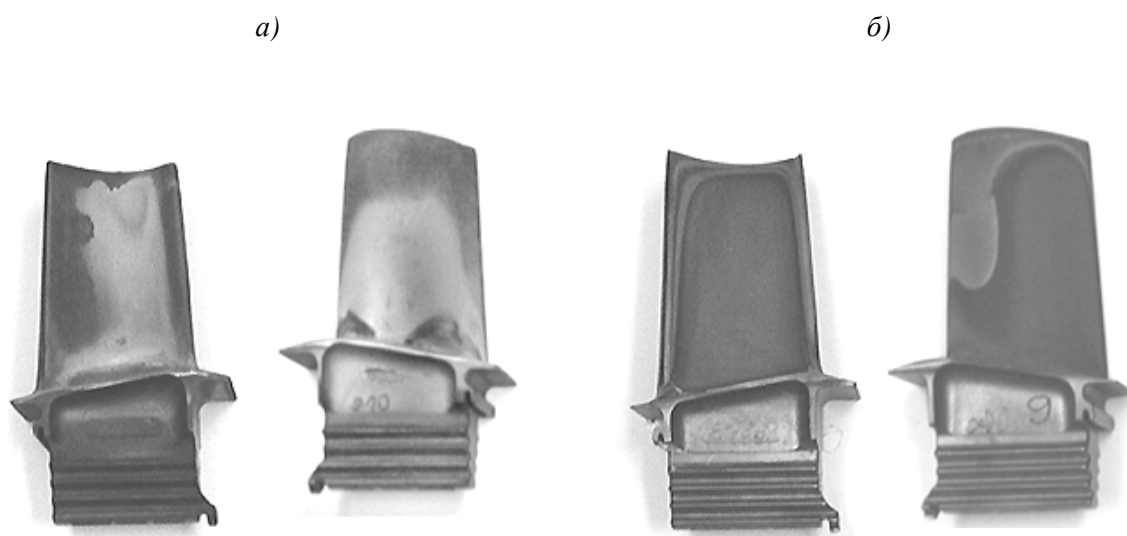


Рис. 4. Внешний вид рабочих лопаток ТВД двигателя РД-33 после удаления покрытия ВСДП-9 + ВСДП-18 методом ЭИТ по режиму:
a – 60 мин, 24 А (2%-ный раствор серной кислоты); *б* – 20 мин, 4 А (2%-ный раствор серной кислоты)

На рис. 4 представлены лопатки после ЭИТ. Как и в случае обработки образцов при малых рабочих токах на отдельную лопатку (4 А), имеет место интенсивное растворение покрытия на кромках пера. На остальной поверхности пера скорость травления покрытия заметно ниже. При увеличении рабочего тока на отдельную лопатку (24 А) равномерность травления улучшается. При продолжительности процесса ЭИТ около 60 мин покрытие с поверхности пера лопатки удаляется полностью. Средняя скорость ЭИТ покрытия составила около 1 мкм/мин.

Металлографические исследования рабочих лопаток турбин после ЭИТ показали, что изменений элементного состава поверхности после процесса ЭИТ в шести про-

извольно выбранных точках наружной поверхности и внутренней полости пера рабочей лопатки турбины двигателя РД-33 не наблюдается. Покрытие с поверхности пера удалено полностью. На рис. 5 представлена микроструктура и в табл. 5 – элементный состав поверхности пера рабочих лопаток после полного удаления покрытий ЭИТ в течение 60 мин.

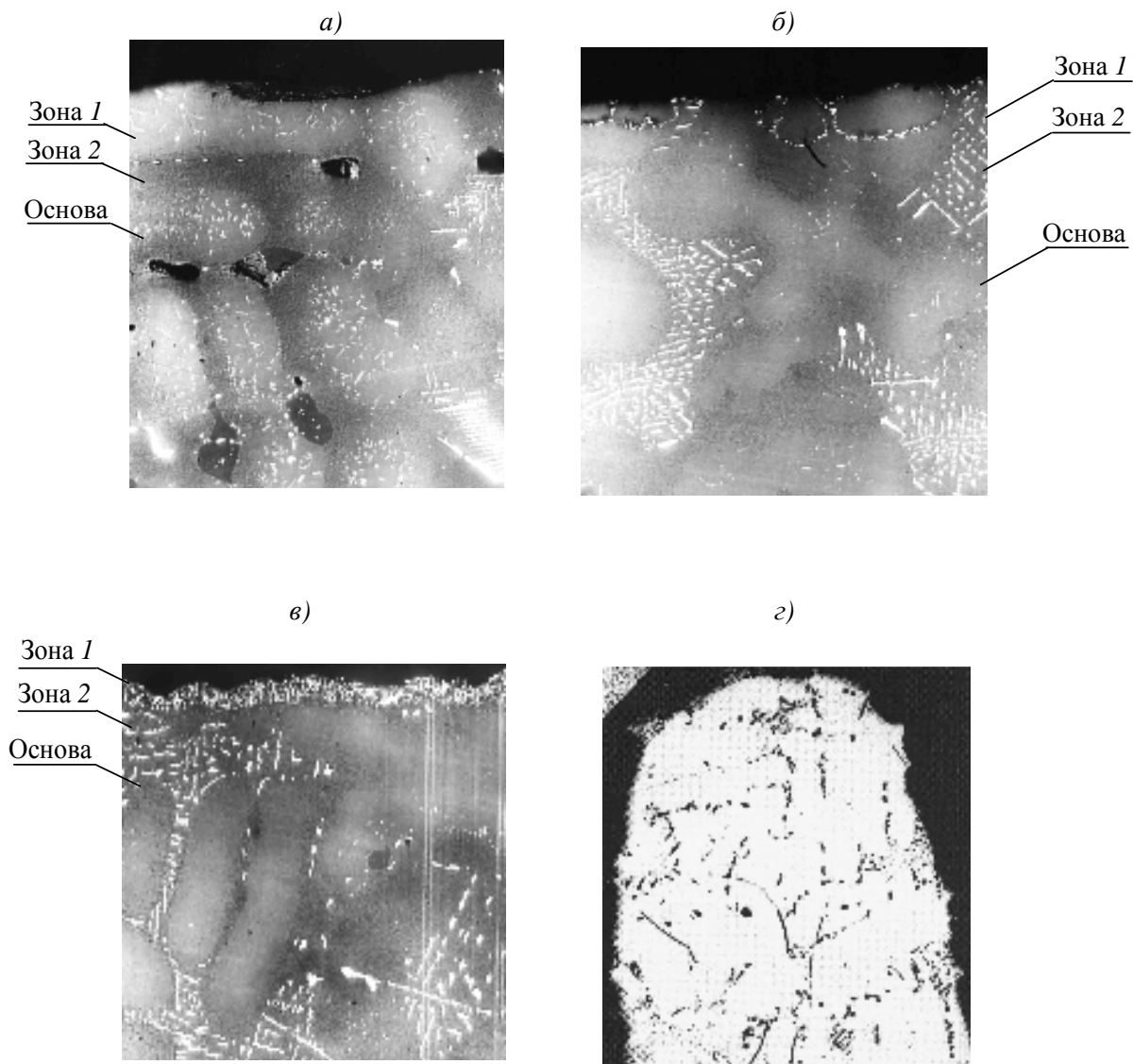


Рис. 5. Микроструктура поверхностного слоя лопатки ТВД двигателя РД-33 после ЭИТ и полного удаления покрытия ВСДП-9+ВСДП-18 (*а, б, в* – $\times 300$; *г* – $\times 100$):

а – спинка; *б* – корыто; *в* – внутренняя полость пера; *г* – часть выходной кромки пера.
Зоны 1 и 2 – см. табл. 5

Элементный состав на различных участках поверхности пера рабочей лопатки из сплава ЖС32 после ЭИТ

Зона пера	Место анализа	Содержание элементов, % (по массе)								
		Al	Cr	Mo	W	Ta	Co	Nb	Re	Ni
Спинка	Зона 1* – край	8,9	5,2	1,0	10,0	4,8	9,6	1,1	3,6	Остальное
	Зона 2*: край	6,3	4,9	1,2	9,8	4,2	9,9	1,2	3,8	–«–
	100 мкм от края	5,5	4,8	1,2	9,7	4,2	9,8	1,2	3,9	–«–
Внутренняя полость	Зона 1 – край	19,2	3,2	0,3	1,1	0,4	8,1	0,1	0,5	–«–
	Зона 2: край	11,9	4,8	0,9	14,3	3,9	9,4	0,9	6,6	–«–
	100 мкм от края	6,0	4,8	1,1	9,7	3,9	9,9	1,1	3,9	–«–
Корыто	Зона 1 – край	6,4	4,9	1,2	9,9	4,4	9,8	1,2	4,1	–«–
	Зона 2: край	6,2	5,0	1,2	9,9	4,2	10,0	1,3	3,9	–«–
	100 мкм от края	5,9	4,8	1,2	9,8	4,2	10,1	1,3	3,9	–«–

* Условное обозначение места анализа – см. рис. 5.

Таким образом, полученные в работе результаты позволили разработать и опробовать опытную технологию удаления защитных покрытий с поверхности пера рабочих лопаток ТВД двигателя РД-33 методом ИТ в вакуумно-дуговой плазме на установке МАП-1М. Показано, что процесс ИТ поверхности может быть использован для удаления отработанных жаростойких покрытий, однако отличается высокими трудоемкостью и стоимостью, так как для травления требуются дорогостоящие трубные катоды из сплавов на основе никеля. Поэтому процесс ИТ целесообразно использовать для удаления с поверхности ЖС тонких слоев толщиной до 10–15 мкм – например, для удаления рекристаллизованных слоев с поверхности монокристаллических лопаток турбин, при проведении ремонта лопаток с неполным удалением старого покрытия, для создания специальных слоев на поверхности деталей перед осаждением защитного покрытия и т. д.

Для удаления отработанных покрытий с поверхности лопаток турбин более эффективна технология ЭИТ, сочетающая физическое и химическое воздействие на покрытие. Процесс позволяет удалять серийные покрытия из сплавов СДП-2, ВСДП-9, ВСДП-11, ВСДП-16, ВСДП-18 и их композиций за 45–60 мин обработки в водном слабokonцентрированном (менее 10%) кислотном электролите. Разработка новой промышленной технологии удаления покрытий методом ЭИТ и оборудования для ее применения в серийном производстве позволит значительно снизить трудоемкость ремонта рабочих лопаток ГТД и уменьшит экологическую нагрузку на окружающую среду при создании ремонтных производств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Елисеев Ю.С., Абраимов Н.В., Крылов В.В. Химико-термическая обработка и защитные покрытия в авиадвигателестроении. – М.: Высшая школа, 1999, 525 с.
2. Мубояджян С.А., Будиновский С.А., Помелов Я.А. Современные процессы ионной обработки поверхности в плазме вакуумного дугового разряда //Сб.: Авиационные материалы и технологии. Вып.: Высокожаропрочные материалы для современных и перспективных ГТД и прогрессивные технологии их производства.– М.: ВИАМ, 2003, с. 92–102.
3. Амитан Г.Л., Байсупов И.А., Барон Ю.М. и др. Справочник по электрохимическим и электрофизическим методам обработки /Под общ. ред. В.А. Волосатова. – Л.: Машиностроение, 1988, 719 с.

4. Головачев В.А., Петров Б.И., Филимошин В.Г., Шманев В.А. Электрохимическая размерная обработка деталей сложной формы.– М.: Машиностроение, 1969, с. 198.
5. Wei B., Lipkin D.M., Spitz L. Electrochemical system and process for stripping metallic coatings // Pat. 6352636 (US), Int. Cl⁷ C25F 5/00, Mar. 5, 2002.
6. Амирханова Н.А., Невьянцева Р.Р., Белоногов В.А., Тимергазина Т.Н. Способ удаления покрытия с металлической подложки: Пат. 2094546 (РФ) //Бюл., № 24, 27.01.1997.
7. Черненко В.И., Снежко Л.А., Папанова И.И. Получение покрытий анодно-искровым электролизом. – Л.: Химия, 1991, 128 с.
8. Мубояджян С.А., Каблов Е.Н., Будиновский С.А., Фурин В.С. и др. Установка для нанесения защитных покрытий: Пат. 2187576 (РФ) //Бюл., № 21, 20.08.2002.
9. Мубояджян С.А., Каблов Е.Н., Помелов Я.А., Будиновский С.А. Способ обработки поверхности металлических изделий: Пат. 2165474 (РФ) //Бюл., №1, 20.04.2001.
10. Будиновский С.А., Мубояджян С.А., Павлов А.Ю. Способ удаления алюминидного покрытия на основе никеля: Пат. 2211261 (РФ) //Бюл., №24, 27.08.2003.
11. Будиновский С.А., Мубояджян С.А. Способ удаления жаростойкого металлического покрытия: Пат. 2228396 (РФ) //Бюл., № 13, 10.05.2004.

УДК 669.018.44:669.24

С.А. Будиновский, С.А. Мубояджян

ПОВЫШЕНИЕ ЖАРОПРОЧНОСТИ ЛИТЕЙНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ ЛОПАТОК ТУРБИН С НЕРЕГЛАМЕНТИРОВАННОЙ СТРУКТУРОЙ МЕТОДАМИ ИОННО-ПЛАЗМЕННОЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ

Развитие жаропрочных литейных никелевых сплавов (ЖС) для лопаток газотурбинных двигателей (ГТД) различного назначения в настоящее время связывают в основном с увеличением в составе сплавов доли Re и Ta, что позволяет поднять температуру солидус сплава и температуру полного растворения основной упрочняющей фазы в системе – интерметаллида никеля Ni₃Al (γ -фазы) [1, 2]. В ряде случаев предлагается вводить в состав сплава Ru, Ir или перейти к другим системам, например на основе NiAl (температура плавления 1638°C) или RuAl (температура плавления 1920°C) [3]. Общим для таких разработок является изменение свойств ЖС в нужном направлении путем объемного легирования материала. Это приводит к заметному росту стоимости современных ЖС и изготовленных из них лопаток турбин, которые, кроме того, должны иметь монокристаллическую структуру. В то же время известно, что применение методов поверхностной обработки материалов в ряде случаев позволяет существенно поднять их прочностные свойства [4]. Известные способы упрочнения поверхности, такие как ионная имплантация, лазерные и пучковые технологии обработки, не обеспечивают заметного прироста прочности ЖС из-за малой глубины модифицированного слоя. При высоких температурах процессы диффузии, релаксации напряжений, эволюции дислокационной структуры материала лопатки приводят к быстрой потере преимуществ модифицированного слоя по сравнению с остальной массой металла.

Целью данной работы является исследование возможности повышения прочности сплава типа ЖС6У при высоких температурах методами ионно-плазменной обработки поверхности в вакуумном дуговом разряде. Изменения элементного и фазового состава поверхности ЖС должны после обработки иметь глубину, соизмеримую с толщиной стенки рабочей лопатки турбины ТВД, – для авиационных ГТД эта толщина обычно составляет ~1 мм.

Упрочнение поверхности с использованием ионно-плазменных методов может быть достигнуто путем изменения состава поверхностного слоя ЖС легированием непосредственно в плазме вакуумного дугового разряда, нанесением на поверхность сплава упрочняющего покрытия, модифицированием состава поверхностного слоя ЖС при вакуумной термообработке композиции сплав–покрытие.